

# アドホックネットワークの輻輳閾値

花澤 諒一\* 森口 一郎\*\*

アドホックネットワークの輻輳閾値を解明するために、ネットワークモデル Random Geometric Network (RGN) 上でTCP/IP通信を想定したシミュレーションを行い、トラフィック輻輳を発生させた。その結果、RGNの輻輳閾値がランダムネットワークと比べて約7分の1と非常に低く、その原因はノードの集団間に存在するノードにトラフィックが集中し、輻輳が発生するためということが判明した。また、スケールフリーネットワークであるバラバシ・アルバートモデルと比較した結果、輻輳閾値はRGNの方が高いが、輻輳閾値以上にパケット発生率を増加させていくと、1ノードあたりのパケット発生率が0.036以上ではRGNのパケット到達率がバラバシ・アルバートモデルより低くなることがわかった。このことからRGNは一度輻輳が発生すると、以降は通信を行うことが非常に困難になることが判明した。RGNの輻輳耐性を向上させる手法としては、平均リンク数を増加させることが有効だということを確認した。これは、ノードの集団がネットワーク全体に及ぶような単一の巨大集団となり、ノードの集団間に存在するノードが存在し得なくなるためである。具体的には、平均リンク数が20のRGNは、平均リンク数が6のRGNと比べて3倍のトラフィック量までネットワーク上で輻輳を発生させずに通信を行えることがわかった。

キーワード：アドホックネットワーク、トラフィック、輻輳、TCP/IP、Random Geometric Networks

## Congestion Threshold of Ad-hoc Networks

Ryoichi HANAZAWA\* and Ichirou MORIGUCHI\*\*

In order to evaluate congestion threshold of ad-hoc network, the simulations emulating TCP/IP on the network model known as Random Geometric Network (RGN) were performed, and network traffic congestion was generated. As a result of this study, the congestion threshold of RGN was found to be around one-seventh of that of Random Network because traffic of RGN concentrates on the nodes between node groups in which nodes are connected each other with many links. Comparing RGN with Barabási-Albert (BA) model which is one of scale-free networks showed that the congestion threshold of RGN is larger than that of BA, and that the packet arriving rate of RGN becomes lower than that of BA for the region that packet generation rate per a node is over 0.036. This indicates that data communication on RGN becomes a difficult situation once congestion emerges. Furthermore, it was confirmed that increasing the average degree is effective for improving the congestion tolerance of RGN. By increasing the average degree, node groups merge into a strongly connected giant network since nodes between node groups disappear. For instance, the maximum amount of traffic of RGN with the average degree 20 was three times that of RGN with the average degree 6.

**Keywords:** ad-hoc networks, traffic, congestion, tcp/ip, random geometric networks

\*東京情報大学 総合情報学部 情報システム学科学部生

2013年7月1日受理

Tokyo University of Information Sciences, Faculty of Informatics, Department of Information Systems

\*2013年4月より興安計装株式会社に所属

\* KOANKEISO Co., Ltd.

\*\*東京情報大学 総合情報学部 情報システム学科

Tokyo University of Information Sciences, Faculty of Informatics, Department of Information Systems

## 1. はじめに

今日ネットワークの通信形態は多様化しており、端末（ノード）間を通信ケーブルで繋ぐ有線ネットワークの他に、新しい通信手法として各ノードが無線電波を送受信し通信を行うアドホックネットワークの普及が期待されている。しかし、アドホックネットワークは現在米軍の一部で使用されているが、まだ一般には利用されていない。

アドホックネットワークには通信を管理するサーバが必要なく、かつアクセスポイントや基地局が必要ないといった利点があり、今後一般的に普及することが見込まれる。一般に普及するにあたって、トラフィック輻輳抑制手法の開発や通信可能距離はどの程度が最適なのかを解明する必要がある。また、この輻輳発生プロセスを解明することは、効率的なルーティング手法や新たな通信プロトコルの開発による輻輳抑制に役立つと考えられる。

本研究では、仮想ネットワーク上で疑似パケットを発生させ、実際のネットワークと近似した条件で通信シミュレーションを行った。このシミュレーションでは、輻輳が発生しない通信トラフィックの限界値（以下、輻輳閾値）をアドホックネットワークのネットワークモデルである Random Geometric Network (RGN)、スケールフリーネットワークのネットワークモデルであるバラバシ・アルバートモデル (BA)、ランダムネットワーク (RN) の異なる性質を持つ3種のネットワークで比較を行った。BAは少数のノードが持つリンクがネットワーク上のリンクの大部分を占めるというインターネットに近い構造を持ち、RGNと輻輳閾値の比較を行うため採用した。また、RNはネットワーク上のリンクが無作為に形成される各ノードが均一なネットワークであり、RGNの特徴を調べるために採用した。

この種の研究としては、BAを用いたWangらの研究があり[1]、スケールフリーネット

ワークは輻輳が発生しやすいネットワークであることが明らかになっているが、アドホックネットワークを対象とした輻輳閾値の研究はない。

シミュレーションの結果、RGNはBAほどではないが、RNと比較して著しく輻輳閾値が低いことが明らかとなった。RGNの輻輳閾値が低い原因は、ノードの集団間をリンクによって繋ぐように位置するノードにトラフィックが集中するためだとわかった。また、平均リンク数を増加させるに従い輻輳閾値を向上させることができた。具体的には、平均リンク数が20のRGNは、平均リンク数が6のRGNと比べて3倍のトラフィック量までネットワーク上で輻輳を発生させずに通信を行うことができた。

## 2. シミュレーション手法

アドホックネットワークの輻輳閾値を解明するために、仮想ネットワーク上で疑似パケットを生成し、パケット通信を行うことで輻輳を発生させた。TCP/IPにはコネクション確立のための3ウェイハンドシェイクや、輻輳制御のためのスロースタートアルゴリズムなど様々な機能があるが、本研究ではそのうちの再送要求のみ考慮したシミュレーションを行った。これはインターネットで一旦発生した輻輳を更に悪化させる主原因が再送によるものであり、RGNにおいてもそれは変わらないと考えられるためである。

実際のネットワークでは時間の進行に伴いパケット通信が行われるが、シミュレーションで連続的な時間の進行に伴う通信処理を行うのは不可能なため、ターンの進行に伴った通信処理シミュレーションを行った。1ターン内で、パケットの発生、パケットの移動、再送要求、パケットの破棄を行い、ターンを繰り返すことによって時間発展させた。また、実際のアドホックネットワークでは端末が移動するが、端末移動に伴う経路やリンク構造の変動は通信パケットの移動時間に比べて非常に遅いため、シミュ

レーション時間内では各端末は移動しないものとした。

シミュレーションを行うにあたって各ノードとパケットの情報を保持しておく必要があったため、全てのノードとパケットに番号を付けて管理した。ノードの情報は受信候補パケット、受信バッファ、キュー処理数の3種とした。また、パケットの情報は発信ノード、宛先ノード、現在地ノードの3種とした。実際のネットワークではノートPC、携帯端末などの様々なモバイル通信機器が存在するが、本研究では全てノードとし、それと同様にノード間で通信可能な経路を全てリンクとした。

## 2.1 RGN (Random Geometric Network)

アドホックネットワークのネットワークモデルとしてはRGNを使用した。予め通信可能距離を決めた上で正方形のフィールド内の無作為な座標にノードを配置し、ノード間の距離が通信可能距離以下ならリンクを形成する。このとき、フィールド境界の影響を軽減するために周期的境界条件を適用した。周期的境界条件は、フィールドの境界とその反対側の境界が繋がっているものとする手法である。

一辺の長さ $L$ のフィールド内に新たなノードをランダムに配置するとき、着目するノードの通信可能距離 $r_i$ 内にその新たなノードが配置される確率 $P$ は以下の式で表せる。

$$p = \frac{\pi r_i^2}{L^2} \quad (1)$$

ここで、右辺の分母はフィールド全体の面積を、分子は着目したノードの通信可能範囲を表す。全ノード数を $N$ とすると、着目しているノード以外は $(N-1)$ 個あるので平均リンク数 $\langle k \rangle$ は、

$$\langle k \rangle = p(N-1) = \frac{\pi r_i^2}{L^2} (N-1) \quad (2)$$

となる。RGNのコントロールパラメータは $N$ 、 $r_i$ 、 $L$ の3つがあるが、この式により平均リン

ク数 $\langle k \rangle$ だけでRGNの構造を指定できることがわかる。

また、RNで、あるノードがリンク $k$ 本を持つ確率 $P(k)$ は以下の式で表せる。

$$P(k) = {}_{N-1}C_k p^k (1-p)^{N-1-k} \quad (3)$$

ここで、 $p^k$ は着目ノードの通信可能距離内にノードが $k$ 個配置される確率で、 $(1-p)^{N-1-k}$ は $k$ 個以外が配置されない確率を表す。また、 ${}_{N-1}C_k$ は着目したノードを除く全てのノードからリンクを $k$ 本持つノードを選択する組み合わせ式である。式(3)は二項分布の確率密度であり、作成したRGNのリンク数確率密度と比較したところ、グラフの曲線が一致することが確認できた(図1)。即ち、RNとRGNは同一のリンク数確率密度に従うことがわかる。

また、ノードが密集している地帯では周辺のノード間リンクの密度も高くなる。その結果、ノード同士の緊密度が高くなり、ノード同士の緊密度を表す指標であるクラスター係数が高くなる。クラスター係数とはノードが持つリンクにより三角形が形成された割合であり、 $i$ 番目のノード $V_i$ のクラスター係数 $C_i$ は以下の式で求められる。

$$C_i = \frac{\text{頂点 } V_i \text{ を含む三角形の数}}{k_i(k_i-1)/2} \quad (4)$$

ここで、 $C_i$ は $V_i$ のリンク数を表す。分母は頂点 $V_i$ とその隣接ノードを含むリンクで形成される三角形の頂点の最大数を組み合わせ式によって表した式である。また、分子は実際に形成された三角形の数である。

全ノードのクラスター係数の平均値をネットワークのクラスター係数といい、ネットワーク上のリンクの緊密度を表す。DallとChristensenの研究によると、RGNのクラスター係数の理論値は平均リンク数に依存せず以下の値になることがわかっている[2]。

$$C=1-\frac{3\sqrt{3}}{4\pi}\doteq 0.587 \quad (5)$$

作成したRGNのクラスター係数を計測した結果、0.586と理論値に近い値が確認できた。一方RNは無作為なノードとリンクを形成し、BAはリンク数を多く持つ少数のノードと高い確率でリンクを形成するため、RNとBAのクラスター係数は0に近い値となる。

更に、RGNは過去の研究で、平均リンク数が4.52以上の場合にはほぼ全てのノードが所属するジャイアントネットワークが発生することが判明している[2]。よって、本研究では通信シミュレーションを行うにあたり、ほぼ全てのノード同士が通信可能となるように平均リンク数5以上のRGNを使用した。

## 2.2 ルーティング情報の取得方法

ルーティングテーブルの管理方法にはスタティックルーティングとダイナミックルーティングがある。

スタティックルーティングは管理者が手動でルーティングテーブルを更新する方式である。基本的にルーティングテーブルを更新しないため、設定した経路上で安定した通信を行うことができるメリットがある。しかし、経路上のノードが故障した場合に管理者が手動で経路情報の更新を行わない限り通信が不可能になるといったデメリットがある。また、アドホックネットワークではノードが移動するため、手動でルーティングテーブルを更新する必要があるスタティックルーティングは使えない。

一方、ダイナミックルーティングは、ノード同士が一定時間ごとに経路情報を自動的に交換することによって自動的にルーティングテーブルを更新する方式である。ルーティングテーブルを自動的に更新するため、ネットワーク上の機器が故障した場合に他の機器を経路として選択できるメリットがある。また、経路情報の交換のために行う通信がネットワークのトラフィックになるといったデメリットがある。

本研究ではシミュレーションの簡易化のため、経路を固定した。そのため本研究では、始めに経路情報を取得し、以降は取得した経路情報に従って通信シミュレーションを行った。この方式は、スタティックルーティングのように手動でルーティングテーブルを更新しないが、ダイナミックルーティングのように時間で経路が変更しないものである。

現在のインターネットで主流となっている通信方式はTCP/IP通信であるため、本研究ではTCP/IP通信を前提としたシミュレーションを行った。通常、通信を行う際は最短経路上をパケットが通過するように通信が行われる。このため、本研究では、実際の通信に近似したシミュレーションを行うために最短経路を使用した通信シミュレーションを行った。大規模なネットワークのシミュレーションであれば複雑で効率的なアルゴリズムの探索手法を用いるべきだが、本研究では1000ノードという小規模なネットワークでのシミュレーションのため、簡易なアルゴリズムであるブロードキャストサーチを用いた。

ブロードキャストサーチではまず始点となる

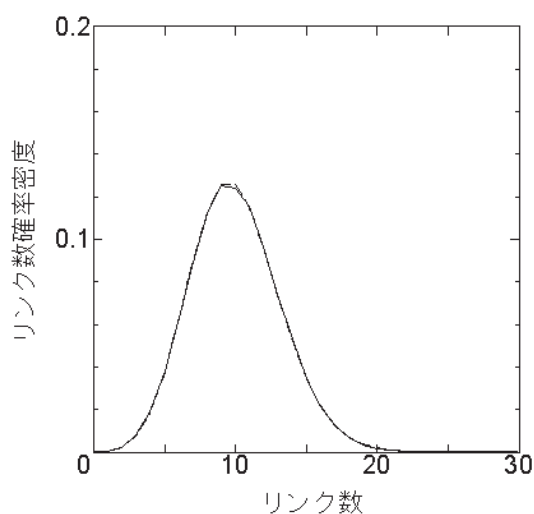


図1 RGNのリンク数分布 $N=100000$ 、 $\langle k \rangle=10$ 点線：二項分布の理論曲線、実線：作成したRGNのリンク数分布



ノードを選択し、始点ノードとリンクが繋がっているノードを探索するとともに、隣接しているノードに対してホップ数1を格納する。次に、ホップ数1が格納されており、かつ未発見のノードに対して2を格納する。これを未発見ノードが存在しなくなるまで続け、全てのノード間の最短経路を探索する。

### 2.3 通信シミュレーション

本研究は通信シミュレーションをターン制で行った。1ターン内で、パケットの発生、パケットの移動、再送要求、パケットの破棄を行い、ターンを繰り返すことによって時間発展させた。既定のターン終了時に輻輳発生判定を行い、輻輳が発生したか判断した。

1ターンでのネットワーク全体のパケット発生数は、パケット発生率とノード数の積により求められる。パケット発生率はプログラム内で与えたパラメータであり、0.001から1.000まで0.001ずつ増加させてシミュレーションを行った。

#### 2.3.1 パケット発生処理

パケットの送信元と送信先のノードを確定するため、発信ノードと宛先ノードを全てのノードから無作為に選定する。次に、選定した2つのノードがリンクによって繋がっていることと、同一のノードが選定されていないことを確認する。もしどちらかの条件に当てはまった場合、ノードの選定をし直す。前者は2つのノード間での通信が不可能なためであり、後者は1つのノード内で通信が完結してしまうためである。ノードの選定終了後、発信ノードと宛先ノードを記憶し、かつ現在地ノードを発信ノードとして記憶する。これを1ターンのパケット発生数を満たすまで繰り返す。

#### 2.3.2 パケット移動処理

全てのパケットに対してルーティングテーブルから次ノードを参照し、次ノードの受信候補パケットとして記憶する。次に、各ノードの受信候補パケットを1ターンで処理可能なキュー処理能力数（1ターンで処理可能なパケット

数）だけ無作為に選定し、ノードの受信バッファとして記憶する。これを全てのパケットに対して行い、受信バッファに選定されたパケットに対して前進・到達処理を行い、そうではないパケットに対して再送・破棄処理を行う。

前進・到達処理では、パケットが次ノードに移動するために、パケットの現在地ノードを次ノードで上書きする。このとき、次ノードが目的地ノードだった場合は、目的地に到達したと判断し到達パケット数をカウントする。到達した場合、以後そのパケットに対して処理を行わない。

再送要求・破棄処理では、再送要求が行われるパケットの再送要求可能数を1減らし、現在地ノードを発信ノードで上書きすることにより再送が行われたものとする。このとき、再送要求可能数が0だった場合はパケットを破棄したと判断し、破棄パケット数をカウントする。破棄した場合、以後そのパケットに対して処理を行わない。本研究では、各パケットの再送要求可能数を実際のTCP/IP通信の標準的な初期設定と同じく一律5とした。

### 2.4 輻輳発生判定

仮想ネットワーク上で輻輳が発生しているかを判断するために、既定のターンまでシミュレーションを行った時点での、処理が終了したパケットの何割が到達しているか（以下、パケット到達率）を参照した。パケット到達率が1未満のときに輻輳が発生していると見なした。ここで処理が終了したパケットとは、宛先ノードに到達したパケットと破棄したパケットのことを指す。シミュレーション終了時点でネットワーク上に存在するパケットは将来宛先ノードに到達するか不明なので考慮しない。

パケット到達率Rは、以下の式によって定義される。

$$R = \frac{A}{A+L} \quad (6)$$

ここで、Aは到達パケット数、Lは破棄パケッ

ト数を表し、それぞれ既定のターンでの値を参照する。

破棄したパケットが存在しなかった場合、 $R = 1$  となり輻輳が発生していない。また、破棄したパケットが存在した場合、 $R < 1$  となり輻輳が発生している。パケット発生率を変動させてシミュレーションを行い、初めて輻輳が発生したときのパケット発生率を輻輳閾値とした。

### 3. シミュレーション結果

シミュレーションのターン数が少なすぎるとネットワーク上のトラフィック量が定常状態に至る前にシミュレーションが終了してしまうため、正確な結果を出力することができない。そのため、本シミュレーションでは十分にトラフィックを発生させるためターン数を10000ターンに設定した。また、本研究のメインとなるRGNでジャイアントネットワークを出現させるため、各ネットワークの平均リンク数を一律6と設定した。さらに、本研究はネットワークの構造的特徴に着目したものであるため、ノードの電波到達範囲やパケット処理能力といった個体差は考慮しない。そのため、各ノードの1ターンあたりのキュー処理数を一律2、受信バッファ数を一律5に設定した。以上の条件でRN、BA、RGN上で通信を行い、輻輳閾値を調べた。

平均リンク数6でのシミュレーションの結果、BA、RN、RGNの輻輳閾値はそれぞれ、「0.005」、「0.067」、「0.010」となった(図2、図5)。RGNの輻輳閾値はRNに比べて非常に低く、輻輳が発生しやすいネットワークだと判明した。RNとRGNはリンク数分布が全く同じにもかかわらず輻輳閾値が大きく異なる原因は、リンクの形成方法の違いにある。RNはランダムなノードにリンクを張るため、遠くのノードとも短い経路で通信を行うことができる。しかし、RGNは通信可能範囲内のノードとのみリンクを形成するため、離れたノードと通信するにはいくつもノードを経由して通信を行う必要があり、RN

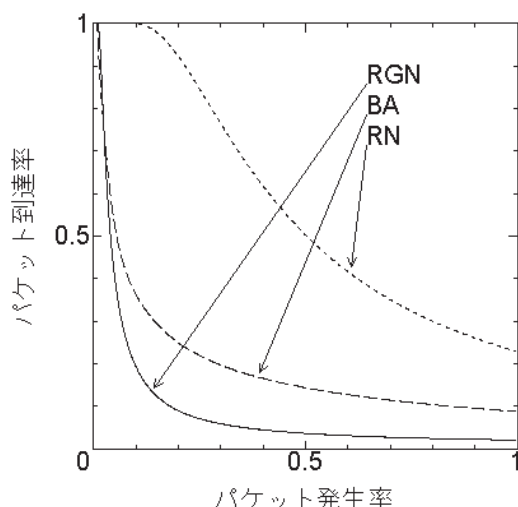


図2 各ネットワークモデルのパケット到達率

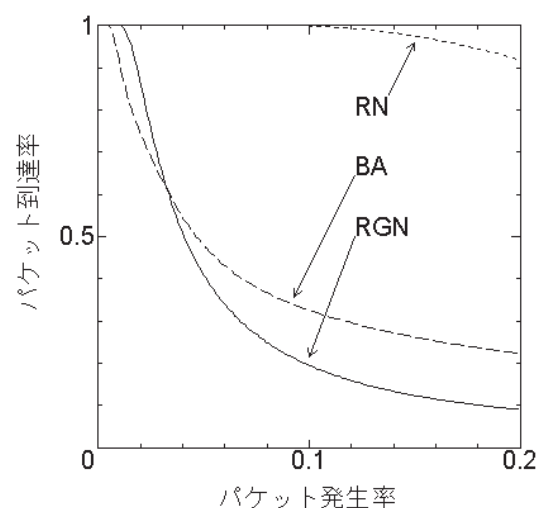


図3 図2の閾値付近拡大図

と比べてネットワーク上にパケットが長く存在してしまうため輻輳が発生しやすい。

また、RGNの輻輳閾値が低い原因追及のためにトラフィックが集中したノードを調査したところ、ノードが密集して形成された集団の間に位置するノード(図4)にトラフィックが集中し、輻輳が発生していることが判明した。また、RGNの輻輳閾値が低い原因追及のためにトラフィックが集中したノードを調査したところ、ノードが密集して形成された集団の間に位

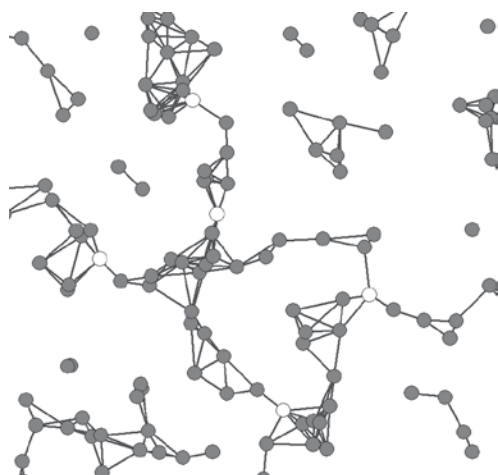


図4 RGNでトラフィックが集中したノードの例

$N=1000$ 、 $\langle k \rangle=4.03$ （一部拡大図）。白点：10000ターンで再送要求を3000回以上発生させたノード。

置するノード（図4）にトラフィックが集中し、輻輳が発生していることが判明した。また、RGNは閾値よりもパケット発生率を増加させていくとパケット到達率が急激に低下する。その結果、BAと比較すると輻輳閾値はBAよりも高いにも関わらず、パケット到達率はパケット発生率0.036で逆転し、以降はRGNの方がパケット到達率は低くなった。このことから、RGNは輻輳が悪化するに従い通信不可能となるノードが急速に増加するネットワークだということが明らかになった。

BAの輻輳閾値が低い原因は、多数のリンクを持つ少数のノードにトラフィックが集中するためだということが過去の研究で述べられている[3]。そのため、BAではノードのリンク数からトラフィックが集中するノードを事前に予測し、処理能力を強化することで輻輳耐性の向上が見込める。しかし、RNとRGNはリンク数やクラスター係数といった各ノード固有の情報からはトラフィックが集中するノード集団の間に位置するノードなどの特定が不可能なため、前述した手法は効果的ではないことが予想できる。そこで、RGNでは平均リンク数を増加さ

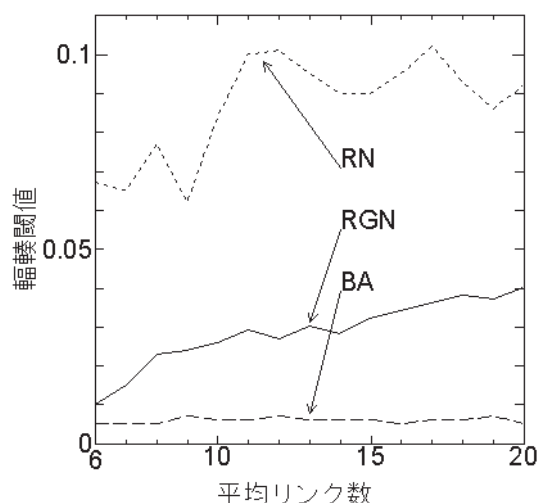


図5 平均リンク数による輻輳閾値の推移

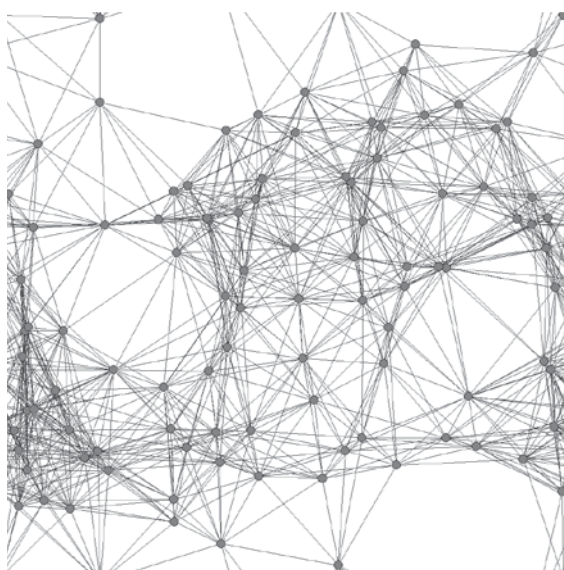


図6 平均リンク数が高いRGNの例

$N=100$ 、 $\langle k \rangle=19.50$

せることで輻輳の抑制を見込み、平均リンク数を増加させてシミュレーションを行った。その結果、RGNは平均リンク数を増加させるに従い輻輳閾値が向上し、平均リンク数が20のときは平均リンク数が6のときと比べて通信可能距離は11.11倍になり、輻輳閾値は3倍になることが判明した（図5）。RGNは、平均リンク数を増加させると通信可能距離が広がるため、よ

り遠くのノードと直接リンクを形成する（図6）。その結果、ノードが密集して形成された集団の規模が大きくなり、集団間でパケットを受け渡すノードが存在しなくなり、輻輳閾値が向上すると考えられる。しかし、現実のアドホックネットワークでは平均リンクを任意に操作することは不可能である。よって、実際にアドホックネットワークの輻輳閾値を向上させるために平均リンクを向上することは有効な手段ではない。

#### 4. ま と め

仮想ネットワーク上で通信シミュレーションを行い、トラフィック輻輳を発生させた結果、RGNが輻輳に弱い構造を持つネットワークであることを明らかにした。また、輻輳に弱い原因は、ノードの集団間に位置するノードにトラフィックが集中するためということが判明した。BAでは有効だったトラフィックが集中するノードの処理能力を向上させる輻輳抑制手法は、RGNではノードの持つ情報からトラフィックが集中するノードを特定できないため適用できない。しかし、RGNの抑制手法としては、平均リンク数を増加させることが有効だとわかった。その原因は、ノードの集団がネットワーク全体に及ぶような巨大な規模となり、ノードの集団間でパケットを受け渡すノードが存在しなくなるからである。

結論として、アドホックネットワークのネットワーク構造では輻輳を回避することはできないことが判明した。平均リンク数を高めることで輻輳耐性を向上できることが明らかになったが、今後は平均リンク数が低いアドホックネットワークでの輻輳抑制手法を模索することが課題として残されている。

#### 【参考文献 (References)】

- [1] W.-X. Wang et al., "Traffic dynamics based on local routing protocol on a scale-free network", Phys. Rev. E, Vol. 73, 026111 (2006).
- [2] J. Dall and M. Christensen, "Random Geometric Graphs", Phys. Rev. E, Vol. 66, 06121 (2002).
- [3] A. Barrat, M. Barthélemy and A. Vespignani, "Dynamical Processes on Complex Networks", pp. 246-250, Cambridge University Press (2008).